

Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES DEFINICIONES DE LOS FACTORES DE DESBALANCE DE TENSIONES Y CORRIENTES EN LOS SISTEMAS TRIFÁSICOS

P.E. ISSOURIBEHERE*
IITREE FI-UNLP
Argentina

J.C. BARBERO
IITREE FI-UNLP
Argentina

G.A. BARBERA
IITREE FI-UNLP
Argentina

Resumen – *La experiencia en mediciones de Calidad de Servicio o Power Quality con equipos estándares del mercado muestra que diferentes fabricantes han implementado la medición de los desbalances utilizando algoritmos de cálculo basados en distintas definiciones, lo cual dificulta la interpretación de los resultados, aún para quien esté advertido de las diferencias que pueden esperarse.*

La definición verdadera del factor de desbalance basada en las componentes de secuencia directa y secuencia inversa es aplicable tanto para tensiones (de fase y de línea) como para corrientes, pero para las otras definiciones y fórmulas aproximadas del factor de desbalance encontradas en normas y bibliografía de reconocido prestigio, la validez de esa generalización es discutible.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo para establecer las condiciones en las que pueden aceptarse los algoritmos de cálculo basados en otras definiciones del factor de desbalance. Los resultados permitirán definir los rangos de compatibilidad entre los niveles de desbalance típicos y/o admisibles que se especifican en las diferentes normativas y evaluar el desempeño de los instrumentos de medición de calidad de suministro que adoptan las distintas definiciones para determinar el factor de desbalance.

Palabras clave: Compatibilidad Electromagnética, Desbalances

1 INTRODUCCIÓN

El desbalance de una variable trifásica es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamientos angulares entre fases distintos de 120 grados eléctricos. La variable trifásica indicada de manera genérica puede ser indistintamente, la tensión fase-neutro, la tensión de línea o la corriente de un sistema trifásico.

El método que computa correctamente el grado de desbalance de una variable trifásica es el que emplea las componentes de secuencia de esa variable, y por lo tanto requiere una medición trifásica, tanto del módulo como de la fase de la variable.

A lo largo de los años se han propuesto diferentes simplificaciones para determinar un factor de desbalance a partir de mediciones del módulo solamente. Pero como se verá más adelante, esas simplificaciones sólo son válidas para determinar el desbalance de una terna de fasores ABC, a partir de mediciones de los módulos de la terna de las diferencias (fasoriales) A-B, B-C, C-A.

Es decir, las fórmulas simplificadas sólo tendrían validez para determinar el desbalance de la terna de tensiones fase-neutro, a partir de mediciones de las magnitudes de la terna de tensiones de línea, dado que para el caso de las corrientes las equivalencias carecen de sentido práctico.

En consecuencia, las expresiones aproximadas no serían aplicables para determinar el desbalance de las tensiones de línea ni el desbalance de las corrientes.

Sin embargo se encuentra en la bibliografía y aún en instrumentos de medición de calidad de energía, que esos métodos aproximados son empleados para determinar indistintamente el desbalance de tensiones (de fase o de línea) y de corrientes.

* Calle 48 y 116, La Plata Pcia. de Bs. As. CP B1900AMF– e-mail: pedroi@iitree-unlp.org.ar

A fin de comparar los valores de los factores de desbalance obtenidos con las distintas aproximaciones, en relación al método basado en las componentes de secuencia, se desarrolló un modelo que genera ternas de tensiones fase-neutro con distintos grados de desbalance, logrados mediante la variación aleatoria en forma independiente para cada fasor, tanto del módulo como de la fase.

Sobre la base de dicho estudio comparativo, se podrá evaluar:

- el desempeño de los instrumentos de medición de calidad de suministro que emplean los distintos métodos para determinar el factor de desbalance.
- la compatibilidad entre los niveles de desbalance típicos y/o admisibles que se especifican en las diferentes normativas.

2 DEFINICIONES

En este apartado se presentan definiciones y expresiones aproximadas para el factor de desbalance que se encuentran en normas y en bibliografía, y aquí se emplean para expresar el factor de desbalance de la terna de tensiones fase-neutro.

Luego se efectuará un estudio comparativo de su aplicabilidad tanto a tensiones de fase como a tensiones de línea.

2.1 Factor de desbalance a partir de las componentes simétricas

La definición verdadera del factor de desbalance de tensiones ([1], [2], [3], [4]) corresponde a la relación entre los módulos de las componentes de secuencia inversa y directa de la tensión, según:

$$K = 100 \frac{U^-}{U^+} \quad (1)$$

Siendo

$$\diamond U^- = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_A + \dot{U}_B e^{j\frac{4}{3}\pi} + \dot{U}_C e^{j\frac{2}{3}\pi} \right) \text{ la componente de secuencia inversa}$$

$$\diamond U^+ = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_A + \dot{U}_B e^{j\frac{2}{3}\pi} + \dot{U}_C e^{j\frac{4}{3}\pi} \right) \text{ la componente de secuencia directa}$$

$$\diamond \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C \text{ las tensiones fase-neutro, expresadas en forma fasorial.}$$

Se considera que esta definición corresponde al valor verdadero del factor de desbalance, porque además, claramente puede ser aplicada también a las tensiones de línea y a las corrientes.

2.2 IEEE

Existen distintas definiciones del desbalance de tensiones y corrientes en diferentes documentos del IEEE. Esto, sumado a las interpretaciones que han hecho distintos autores y fabricantes de instrumentos, ha creado confusión en cuanto a la medición del desbalance.

Las diferencias de interpretación surgen porque, aparte de las distintas definiciones, nunca se indica específicamente si, en el caso de las tensiones, deben emplearse las tensiones de fase o las tensiones de línea.

En [5] y [6] se definen, en palabras, dos factores, aplicables tanto sea a las tensiones como a las corrientes:

- a) Factor de desbalance: relación de la componente de secuencia negativa a la componente de secuencia positiva. Esta definición es idéntica a la expresada en el apartado 2.1. mediante (1).
- b) Razón de desbalance: Considerando los valores eficaces de las componentes fundamentales del sistema trifásico, se define como la diferencia entre el mayor valor y el menor valor, referida al valor medio de los tres valores eficaces. Formalmente:

$$K = \frac{\text{Max}(|U_1 - U_{med}|, |U_2 - U_{med}|, |U_3 - U_{med}|)}{U_{med}} \cdot 100 \quad (2)$$

Siendo

$$U_{med} = (U_1 + U_2 + U_3) / 3$$

U_1, U_2, U_3 los módulos de las tres tensiones (de fase o de línea).

En [2] se aplican dos formas de medir el desbalance, pero en un apartado titulado *Desbalance de tensiones de fase en sistemas trifásicos*. Una de ellas es la definición dada por (1) y la otra:

- c) Desbalance porcentual: La máxima desviación respecto al valor medio de cada fase, referida al valor medio de las tres fases. Es decir:

$$K = \frac{3 \cdot (U_{max} - U_{min})}{U_1 + U_2 + U_3} \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo

U_{max} el máximo valor de los módulos de las tres tensiones (de fase o de línea).

U_{min} el mínimo valor de los módulos de las tres tensiones (de fase o de línea).

U_1, U_2, U_3 los módulos de las tres tensiones (de fase o de línea).

En [3] se define un factor de desbalance mediante (1), llamándolo indistintamente *voltage imbalance* y *voltage unbalance*, y para estimarlo se propone la expresión (3) para la cual, si bien no hay indicación específica, se presenta un ejemplo en el que se emplean las *tensiones de línea*.

También en [7] se define el desbalance de tensiones con la expresión (3) y se presenta un ejemplo en el que se emplean las *tensiones de línea*, pero no hay indicaciones acerca de las magnitudes a emplear.

La definición dada en a) corresponde, tal como se mencionó, a la del apartado 2.1. Las confusiones aludidas surgen con el empleo y aplicabilidad de (2) y (3).

En efecto, de lo expuesto y considerando diferentes documentos del propio IEEE, cabe interpretar que tanto (2) como (3) se pueden emplear para determinar el factor de desbalance tanto para tensiones de fase como para tensiones de línea, dado que no se indica explícitamente que deban usarse exclusivamente unas u otras.

2.3 NEMA

National Electrical Manufacturers Association of USA adopta en [8] la definición b) del IEEE, con la misma ambigüedad en cuanto al empleo de tensiones de fase o de línea, si bien en el ejemplo de cálculo que se presenta se emplean las *tensiones de línea*⁽¹⁾.

Esta misma definición es adoptada por ANSI [9].

2.4 CENELEC

CENELEC [12] adoptó la expresión presentada en [1]:

$$K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

Siendo

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} los módulos de las tres tensiones de línea.

2.5 Pillay-Hofmann-Manyage

En [13] y [14] se propone una expresión aproximada que evita el empleo de álgebra fasorial con las componentes simétricas, y da una buena aproximación al valor real del factor de desbalance:

$$K = 82 \sqrt{\frac{3 \cdot (U_{ABM}^2 + U_{BCM}^2 + U_{CAM}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} \quad (5)$$

Siendo

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} los módulos de las tres tensiones de línea.

$U_{ABM}, U_{BCM}, U_{CAM}$ Diferencia entre la magnitud de cada tensión de línea y el promedio de las tres.

3 SIMULACIÓN DE CASOS DE PRUEBA PARA REALIZAR LAS VERIFICACIONES.

En lo que sigue se presentan las diferentes formas en que se evaluó el desbalance de tensión en relación con la definición verdadera basada en las componentes simétricas.

⁽¹⁾ En [10] se indica que NEMA emplea las tensiones *fase-neutro*, sin embargo en lugar de citar como referencia un documento de NEMA se cita a [11], cuando en realidad en [11] se indica que NEMA emplea las *tensiones de línea*, lo cual es correcto.

3.1 Lote de datos de prueba N° 1. Desbalance de módulo y de fase y presencia de componente homopolar.

Se generaron en forma aleatoria ternas de tensiones fase-neutro de módulo $U_i \pm \Delta U_i$ con diferencias de fase entre sí $120 \pm \Delta \phi_i$ grados eléctricos. En este modelo se han tomado ΔU_i y $\Delta \phi_i$ de manera tal que guarden la relación indicada en la Fig. 1.

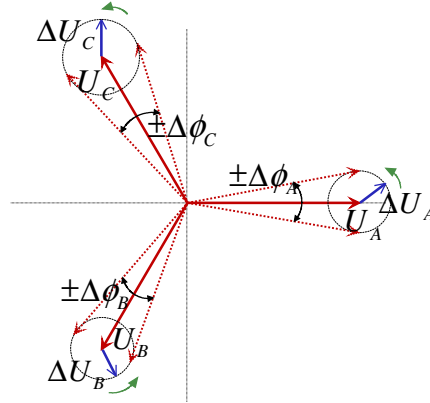


Fig. 1. Esquema de generación aleatoria las ternas de tensiones de fase desbalanceadas.

Es decir, para $0 \leq \Delta U_i \leq 0,05$ pu (que corresponde a un valor aleatorio entre $0,95$ pu $\leq U_i \leq 1,05$ pu), resulta:

$$\Delta \phi_i = \pm \tan^{-1}(\Delta U_i) = \pm 2,86^\circ$$

Se generaron 1000 ternas aleatorias de tensiones fase-neutro caracterizadas por los valores de la Tabla I.

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE LAS TERNAS ALEATORIAS DEL LOTE DE DATOS N° 1.

	U_A [V]	ϕ_A [°]	U_B [V]	ϕ_B [°]	U_C [V]	ϕ_C [°]	U^0 [V]	U^+ [V]	U^- [V]
Min	209.1	-2.97	209.0	237.0	209.0	117.0	0.089	210.0	0.042
Max	231.0	2.99	231.0	243.0	231.0	123.0	12.1	229.7	12.2
P95	230.1	2.67	230.1	242.6	230.0	122.7	8.83	226.6	9.22

3.2 Lote de datos de prueba N° 2. Desbalance de módulo y presencia de componente homopolar.

Para poner de manifiesto el efecto del desequilibrio angular se repitió el procedimiento anterior para:

$$0 \leq \Delta U_i \leq 0,05 \text{ pu} \quad \text{y} \quad \Delta \phi_i = \pm \tan^{-1}(\Delta U_i) = \pm 0,1^\circ$$

Nuevamente se generaron 1000 ternas aleatorias de tensiones fase-neutro que resultaron caracterizadas por los valores indicados en Tabla II.

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DE LAS TERNAS ALEATORIAS DEL LOTE DE DATOS N° 2.

	U_A [V]	ϕ_A [°]	U_B [V]	ϕ_B [°]	U_C [V]	ϕ_C [°]	U^0 [V]	U^+ [V]	U^- [V]
Min	209.1	-0.10	209.0	239.9	209.0	119.9	0.140	210.1	0.085
Max	231.0	0.10	231.0	240.1	231.0	120.1	7.0	229.8	6.8
P95	230.1	0.09	230.1	240.1	230.0	120.1	5.81	226.6	5.80

3.3 Lote de datos de prueba N° 3. Desbalance de módulo y de fase, sin componente homopolar.

Para investigar el efecto de la componente de secuencia cero, a la que se le atribuye cierto peso en los resultados [11], se generaron en forma aleatoria ternas de tensiones desbalanceadas sin componente homopolar. La generación aleatoria de ambas componentes se basó en los siguientes objetivos:

$$\begin{aligned} 0 \leq |U^-| \leq 0,05 \text{ pu} & \quad \text{y} \quad -180^\circ \leq \text{Fase}(U^-) \leq +180^\circ \\ |U^+| = 1 \text{ pu} & \quad \text{y} \quad \text{Fase}(U^+) = 0^\circ \end{aligned}$$

Se generaron 1000 ternas aleatorias de tensiones fase-neutro caracterizadas por los valores de la Tabla III.

TABLA III. CARACTERIZACIÓN DE LAS TERNAS ALEATORIAS DEL LOTE DE DATOS N° 3.

	U_A [V]	ϕ_A [°]	U_B [V]	ϕ_B [°]	U_C [V]	ϕ_C [°]	U^0 [V]	U^+ [V]	U^- [V]
Min	209.4	-2.8	209.2	-122.8	209.2	117.1	0	220.0	0.005
Max	230.7	2.8	231.0	-117.2	230.8	122.8	0	220.0	11.0
P95	227.9	2.0	227.7	-118.0	227.9	122.1	0	220.0	10.5

4 VERIFICACIONES REALIZADAS A LOS DISTINTOS MÉTODOS

Los métodos presentados se aplicaron a los tres conjuntos de datos de prueba y se compararon con los resultados del método de las componentes de secuencia, el cual se considera como referencia. Además se compararon entre sí los resultados obtenidos con (2) y (3), correspondientes a las definiciones del IEEE.

Las comparaciones se efectuaron mediante diagramas de dispersión. En todos ellos, el eje de abscisas corresponde al factor de desbalance obtenido mediante el método que se indica, aplicado a la terna de tensiones *fase-neutro*. Además en todos los diagramas (a), (b) y (c) se corresponden, respectivamente, con los lotes de datos de prueba de los apartados 3.1., 3.2. y 3.3.

4.1 IEEE

Se estudió el grado de aproximación de los resultados de medir el factor de desbalance de tensión con las tres definiciones, con la variante de emplear en (2) y en (3) las tensiones de fase y las tensiones de línea.

4.1.1 Método (b) de IEEE

Se realizaron las determinaciones del factor de desbalance empleando la expresión (2) primero con las tensiones *de línea* (Fig. 2) y luego con las tensiones *de fase* (Fig. 3).

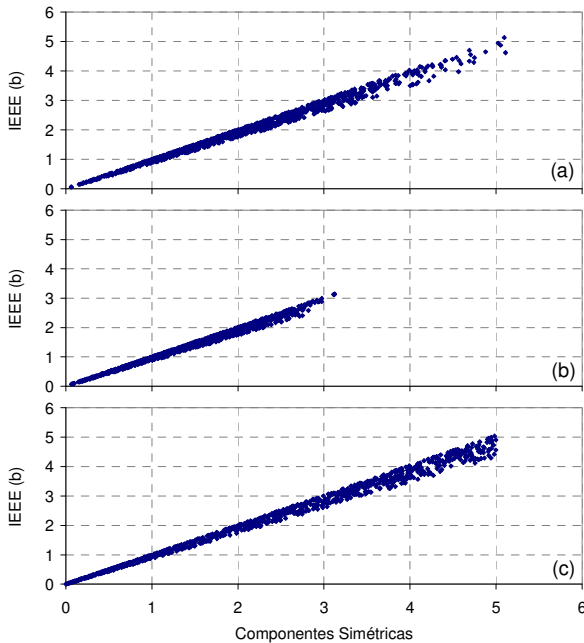


Fig. 2. Método (b) de IEEE con tensiones de línea.

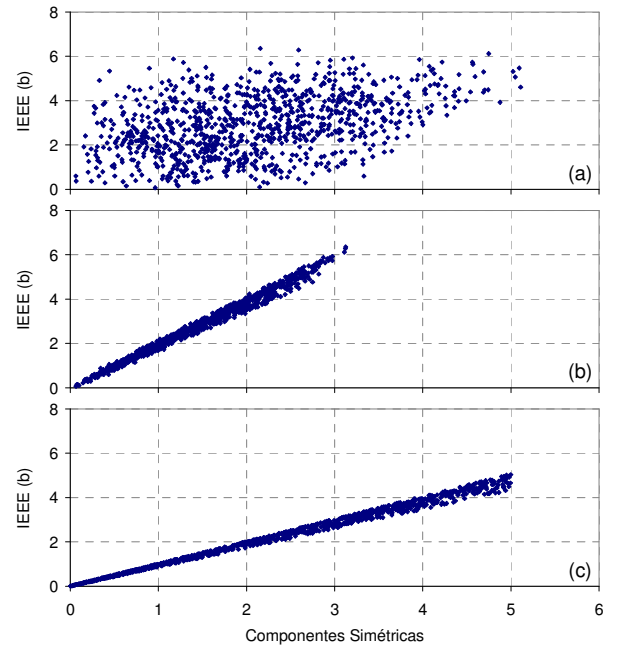


Fig. 3. Método (b) de IEEE con tensiones de fase.

Se comprobó que, para todos los casos simulados, el factor K de desbalance de tensiones *fase-neutro* se puede determinar empleando (2) con las tensiones *de línea*, con una incerteza que aumenta con el valor de K llegando a ser $\pm 5\%$ para $K=3$.

Por otra parte, la expresión (2) utilizada con tensiones *fase-neutro* para evaluar el factor de desbalance de tensiones *fase-neutro*, sólo arroja resultados aceptables en ausencia de componente homopolar.

4.1.2 Método (c) de IEEE

Se realizaron las determinaciones del factor de desbalance empleando la expresión (3) primero con las tensiones *de línea* (Fig. 4) y luego con las tensiones *de fase* (Fig. 5).

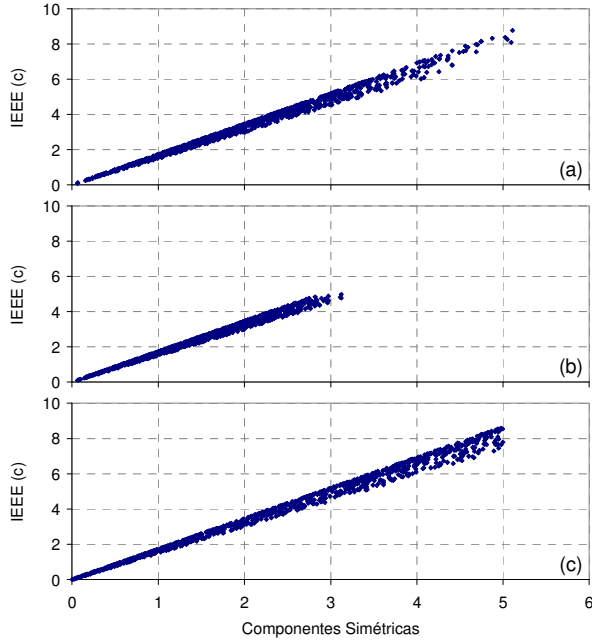


Fig. 4. Método (c) de IEEE con tensiones de línea.

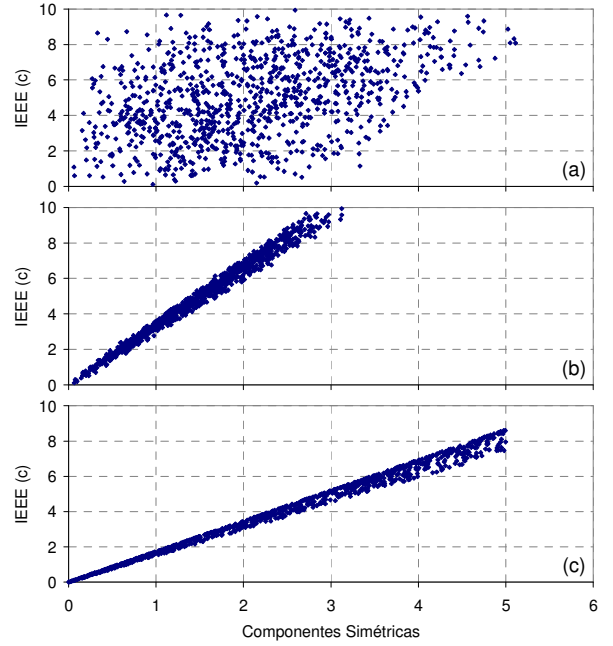


Fig. 5. Método (c) de IEEE con tensiones de fase.

Se encontró que la expresión (3) utilizada con tensiones *de línea* para evaluar el factor de desbalance de tensiones *fase-neutro*, debería corregirse por un factor 0,6 y en tal caso, la incerteza (que aumenta con el valor de K) llegaría a ser $\pm 6\%$ para $K=3$. Empleada con tensiones *fase-neutro* para evaluar el factor de desbalance de tensiones *fase-neutro*, la incerteza de los resultados es inaceptable

4.1.3 Comparación de ambos métodos de IEEE entre sí

En la Fig. 6 se representan los valores obtenidos empleando en (3) las tensiones de línea con respecto a los valores obtenidos empleando en (2) las tensiones de fase.

En la Fig. 7 se representan los valores obtenidos mediante (3) con respecto a los valores obtenidos con (2), esta vez empleando las tensiones de fase en ambas expresiones.

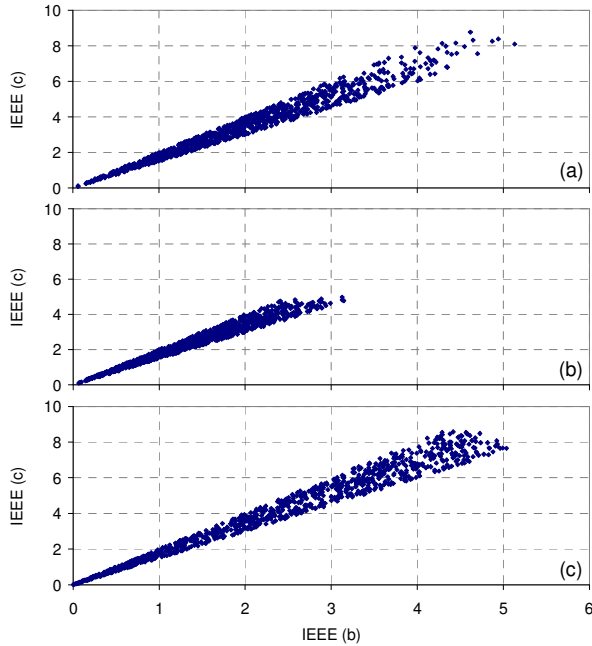


Fig. 6. Método (c) de IEEE con tensiones de línea vs. Método (b) con tensiones de fase.

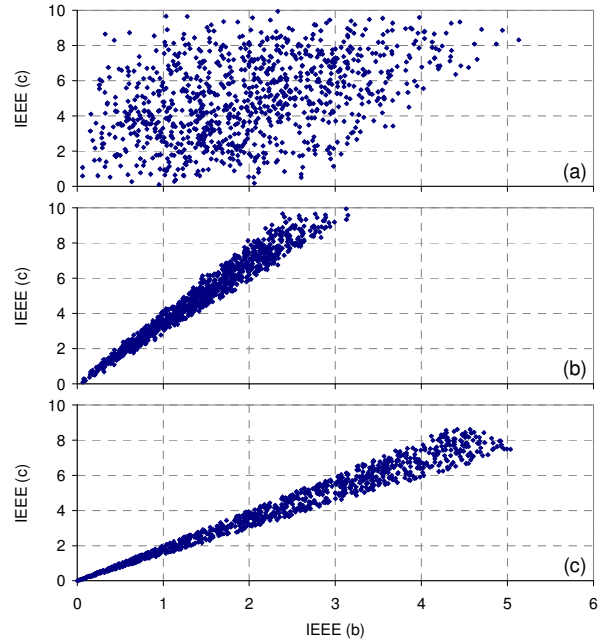


Fig. 7. Método (c) de IEEE con tensiones de fase vs. Método (b) con tensiones de fase.

Se comprueba, tal como se menciona en [11] que los resultados de aplicar ambas definiciones del IEEE pueden diferir en un factor 2 o aún mayor.

4.2 NEMA

De acuerdo a lo mencionado en 2.3. la definición de NEMA se corresponde con el método (b) del IEEE empleado con las tensiones de línea. Por lo tanto los resultados son los indicados en la Fig. 2.

4.3 CENELEC

Los resultados obtenidos con la expresión (4) se presentan en la Fig. 8.

4.4 Pillay-Hofmann-Manyage

Los resultados obtenidos con la expresión (5) se presentan en la Fig. 9.

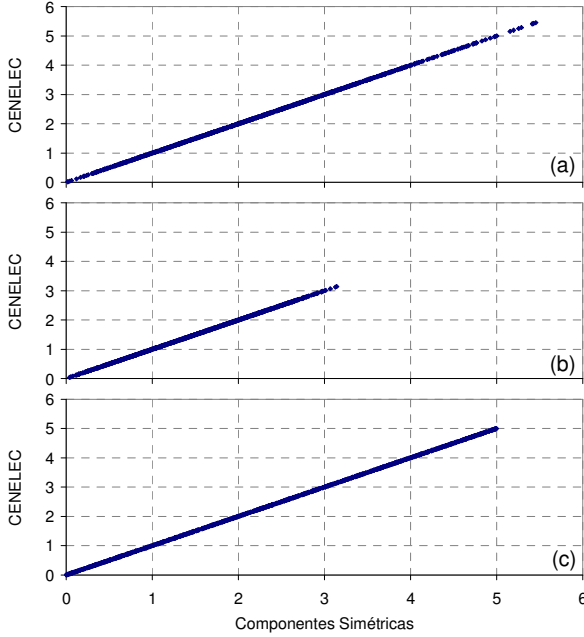


Fig. 8. Fórmula de CENELEC.

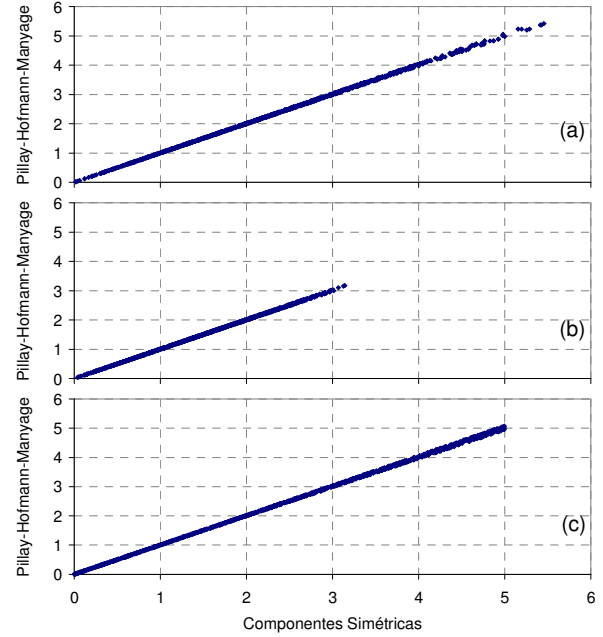


Fig. 9. Fórmula de Pillay-Hofmann-Manyage.

5 CONCLUSIONES

Este estudio adquiere importancia a partir de la experiencia resultante de la práctica de las mediciones de Calidad de Servicio o *Power Quality*, en general, con equipos estándares del mercado los que suelen medir los desbalances utilizando algoritmos de cálculo implementados con diferentes definiciones. Esto hace dificultosa la interpretación de los resultados, dificultad que se potencia cuando éstos están próximos a los límites tolerados.

El estudio realizado en este artículo permite comparar las diversas definiciones y establecer las condiciones en las que pueden aceptarse los algoritmos de cálculo que se aparten a la definición estricta IEC.

La definición verdadera del factor de desbalance dada por (1) puede ser aplicada tanto para tensiones (de fase y de línea) como para corrientes.

De lo expuesto aquí surge que las expresiones (2) a (5) deben ser utilizadas con tensiones *de línea* para evaluar el factor K de desbalance de las tensiones *fase-neutro*. En estas condiciones:

- ◇ Con (2) la incerteza en los valores de K aumenta con K llegando a ser $\pm 5\%$ para $K=3$.
- ◇ La expresión (3) debería corregirse por un factor 0,6, y en tal caso la incerteza en los valores de K (que también aumenta con K) llegaría a ser $\pm 6\%$ para $K=3$.
- ◇ La incerteza en los resultados obtenidos con las expresiones (4) y (5) es despreciable.

El hecho de que las expresiones (2) a (5) se deban emplear con tensiones de línea para determinar el factor K de desbalance de las tensiones *fase-neutro*, indica que dichas expresiones no pueden usarse para determinar desbalances de corrientes, dado que no es posible obtener por medición directa los módulos de I_{AB} , I_{BC} e I_{CA} requeridos en dichas expresiones.

Por lo tanto, para determinar los desbalances de las corrientes en forma rigurosa sería necesario medir las corrientes trifásicas en módulo y fase, para poder aplicar el método de las componentes simétricas o para determinar por operación fasorial las corrientes diferencia: I_{AB} , I_{BC} e I_{CA} .

Los valores que se indican como referencia en diferentes países [10] deben ser considerados a la luz de estas conclusiones, teniendo presente la definición que se ha empleado para determinarlos.

Del mismo modo se debe proceder al considerar los valores medidos por los distintos registradores de calidad de energía aún existentes en el mercado, habida cuenta de que algunos de ellos, de reconocido prestigio, emplean la expresión (3) para determinar el desbalance de tensiones y corrientes; y peor aún, en algún caso a partir de las tensiones (y corrientes) de fase (caso estudiado en la Fig. 5).

6 REFERENCIAS

- [1] A. Robert and J. Marquet. "Assessing Voltage Quality with relation to Harmonics, Flicker and Unbalance". *CIGRE WG 36.05*, Paper 36-203. 1992
- [2] IEEE 1993. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". (Red Book) *ANSI-IEEE Std. 141*, 1993
- [3] IEEE 1995. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". *IEEE Std. 1159*. June, 1995.
- [4] IEC-2003. "Electromagnetic compatibility. Testing and measurement techniques. Power Quality Measurement Methods". *IEC 61000-4-30*. 2003.
- [5] IEEE-1987. "IEEE guide for self-commutated converters". *ANSI/IEEE Std 936-1987*.
- [6] IEEE-2000. "The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. Seventh Edition". *ANSI/IEEE Std 100-2000*.
- [7] IEEE 2004. "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators". *IEEE Std. 112* (Revision of the IEEE Std. 112-1996).
- [8] NEMA 1993. "Motors and Generators". *National Electrical Manufacturers Association of USA. Standard MG1*, Section 14.34.
- [9] ANSI-NEMA 1995. "Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hz)". *ANSI C84.1* - 1995.
- [10] CIGRE-2004. "Power Quality Indices and Objectives". *Joint Working Group CIGRE C4.07 / CIREN. Final WG Report*. March, 2004.
- [11] M.H.J. Bollen. "Definitions of Voltage Unbalance". *IEEE Power Engineering Review*, November 2002. pp. 49-50.
- [12] CENELEC 1999. "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". *European standard EN 50160*, CENELEC, Brussels/Belgium, 1999. November 1999.
- [13] P. Pillay and M. Manyage. "Definitions of Voltage Unbalance". *IEEE Power Engineering Review*, May 2001. pp. 49-50.
- [14] P. Pillay, P. Hofmann and M. Manyage. "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Volume 17, Issue 4, pp. 485 – 491. Dec. 2002.
- [15] M. de Oliveira, A.L. Ferreira Filho, D. de Oliveira and G. Hwang. "Voltage unbalance monitoring in CEB systems". *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Vol. 1, pp. 214-219. 2002.